

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.09.019

基于 SNA 的区域航空物流网络空间结构研究

杨 扬, 董红丹, 谭慧芳

(昆明理工大学, 交通工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 为了研究区域航空物流网络空间结构特征及优化布局问题, 在关系数据的基础上, 采用社会网络分析 (Social Network Analysis, SNA) 方法, 构建了一种针对有向多值型网络空间结构的量化分析体系。运用核心-边缘结构、凝聚子群、伯特结构洞以及拓扑分析模型, 选取核心度、边关联度、限制度、等级度和冗余度 5 个定量指标从分布特征、群聚特征、连接机制和凝聚性 4 个角度对云南省航空物流网络的空间结构特征进行了描述和分析。结果显示: 云南省航空物流网络以昆明为核心呈中心发散的状态, 西双版纳、丽江和大理形成的次级区域对中心节点昆明的依赖性过高; 昆明、西双版纳、大理及丽江间的连接稳定性、密集性强度较高, 网络内部空间组织分化比较明显; 核心区与密集区集中于旅游热点区域, 空间布局较少兼顾与产业布局和跨境口岸之间的衔接。最后结合指标测算分析结果和云南省过境物流、东盟贸易的需求, 充分利用现有交通资源, 提出以昆明-西双版纳为“双核”的“双环形航空走廊”网络的空间布局优化建议。

关键词: 运输经济; 空间布局优化; 社会网络分析法; 航空物流; 有向多值型网络; 区域空间结构

中图分类号: F560

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2017) 09-0138-08

A SNA-based Study of Spatial Structure of Regional Aviation Logistics Network

YANG Yang, DONG Hong-dan, TAN Hui-fang

(School of Traffic Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to study the spatial structure features and layout optimization problem of regional aviation logistics network, based on the relationship data, a quantitative analysis system for directed multi-value network spatial structure is established by using social network analysis method. By using the models of core-periphery structure, cohesive subgroup, Bert structural hole and topology analysis, selecting 5 quantitative indicators including coreness, edge connectivity, constraint, hierarchy, redundancy, the spatial structure features of aviation logistics networks in Yunnan Province are described and analyzed from the aspects of distribution feature, clustering feature, connection mechanism and cohesion. The result shows that (1) the network of Yunnan aviation logistics network takes Kunming as the core and it is central diverging, the sub-region formed by Xishuangbanna, Lijiang and Dali has excessive dependence on the central node Kunming; (3) the connection stability and intensity among Kunming, Xishuangbanna, Lijiang and Dali are relatively higher, the spatial differentiation of the internal space of the network is obvious; (4) the core and dense areas concentrated in tourist hot spots, while the spatial layout less considered the cohesion between industrial layout and cross-border ports. Finally, to make full use of existing traffic resources, the suggestion of space layout optimization of “dual annular aviation corridor” network with “dual core” formed by Kunming and Xishuangbanna is advanced combining with the calculation result of indicators and demands of cross-border transit logistics and ASEAN trade in Yunnan Province.

收稿日期: 2016-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71463035)

作者简介: 杨扬 (1974-), 男, 江苏常州人, 博士, 副教授. (yytongji@163.com)

表 2 云南省航空货运强度邻接矩阵

Tab. 2 Adjacency matrix of air freight intensity in Yunnan Province

节点	昆明	丽江	大理	西双版纳	芒市	腾冲	迪庆	昭通	文山	保山	临沧	普洱
昆明	—	0.16	0.06	0.04	0.19	0.07	0.01	0.01	0	0	0.03	0.02
丽江	0.11	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
大理	0.01	0	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0
西双版纳	0.20	0.01	0	—	0	0	0	0	0	0	0	0
芒市	0.01	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0
腾冲	0.01	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0
迪庆	0.02	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0
昭通	0.01	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0
文山	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0
保山	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0
临沧	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0
普洱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—

江、昆明→芒市、丽江→昆明、西双版纳→昆明)；货运强度值介于 0.01 - 0.099 之间（昆明→迪庆、昆明→腾冲、昆明→大理、昆明→临沧、昆明→普洱、昆明→西双版纳、迪庆→昆明、保山→昆明、芒市→昆明)；货运强度值介于 0.005 - 0.009 之间（昆明→昭通、昆明→保山、昆明→文山、昭通→昆明、大理→昆明、西双版纳→丽江)；货运强度值介于 0.001 - 0.004 9 之间（文山→昆明、大理→西双版纳、丽江→西双版纳)。

1.2 研究方法

社会网络分析法（SNA）是刻画网络形态、特性和网络结构的一种重要分析方法，自 20 世纪 60 年代起，由社会学大师怀特（Harison White）及其后继者伯曼（Boorman）、布里格（Brieger）和弗里曼（Freeman）等人由数学的图形理论导演出来的一套数学分析方法，可以有效地对网络结构进行测量^[26]。与属性数据（如人口、城市经济数据等）分析的角度不同，社会网络分析法强调网络中节点间关系数据的重要性，并综合考虑节点间直接和间接关系的影响，应用一系列算法量化和描述网络中节点的集聚形态。针对航空物流这一有向多值型网络，在社会网络分析法的基础上，提出一种网络空间结构的量化分析体系，分析框架见表 3。

1.2.1 分布特征与核心 - 边缘分析

分布特征主要描述一定规模内的网络资源走向、集聚情况。连续型核心 - 边缘模型能基于网络中边的权值的关系强度，对网络中的航空物流节点的“位置”结构进行量化分析，根据模型所估算出的核心度，从而判断航空物流节点处于网络中的位置（核心、半边缘、边缘）。在社会网络分析中，核心

度可用于量化分析节点在整个网络中所处的位置，从而对网络的分布特征和节点的位置结构有一个量化的认识。

表 3 有向多值型航空物流网络结构的定量分析框架

Tab. 3 Quantitative analysis framework of directed multi-value aviation logistics network structure

网络空间结构的描述	定量指标	模型方法
分布特征：网络资源走向、集聚情况	核心度	连续型核心 - 边缘分析模型
群聚特征：子群结构的构成和分化	边关联度	Lambda 集合 - 凝聚子群分析
连接机制：节点间连接的依赖性	限制度、等级度	伯特结构洞分析
凝聚性：联系密集所呈现的凝结和聚团	冗余度	拓扑分析

1.2.2 群聚特征与凝聚子群分析

群聚特征是描述子群结构的构成和分化，运用 Lambda 集合 - 凝聚子群分析，从网络连接关系的稳健性角度研究网络由哪些子群组成。凝聚子群是满足如下条件的一个网络节点子集合，即在此集合中的节点之间具有相对较强、直接、紧密、经常或积极的关系。由凝聚子群的定义可知，可从多个角度分析网络节点间的关系属性，Lambda 集合属于基于“子群内外关系”的凝聚子群类型中的一种，相对于其他子群，Lambda 集合的定义没有那么严格，可被用于分析一个网络中内外联系的稳健子结构的划分问题。

1.2.3 连接机制与伯特结构洞分析

运用伯特结构洞理论中的限制度和等级度指标对节点间的连接机制进行描述，研究航空物流节点在网络的连接过程中对其他航空物流节点的控制性

和节点间的相互依赖性。伯特结构洞分析是讨论复杂关系网络（网络规模 ≥ 3 ）中处于中介节点的信息传递及资源控制情况。根据伯特结构洞理论，复杂关系的维持必须依赖于第三者（即三方关系中处于中介位置的节点），伯特结构洞分析强调了网络中三方关系的重要性，指出处于中介连接作用的节点的控制优势和信息优势，综合考虑节点间直接传递和间接控制的关系影响效果，最终从整体网络的角度描述节点在连接关系上所体现出的资源控制情况和产生的依赖性。

1.2.4 凝聚性与拓扑分析

节点联系越紧密，则越易造成网络内节点在拓扑结构上呈现出凝结和聚团，社会网络分析法中的冗余度指标对节点间连接的便利性和联系紧密度进行了量化描述。冗余度高说明节点间航线建设较密集，相互之间流通便利，容易形成航空城市群，凝聚性较高。

2 航空物流网络结构分析定量指标

根据社会网络分析法，选取了能够反映航空物流网络空间结构的5个定量指标。

2.1 核心度

针对云南省航空物流这一有向多值型网络，建立连续型的核心-边缘模型计算每个节点的核心度：

$$\rho = \sum_{i,j} a_{ij} \delta_{ij}, \quad (1)$$

$$\delta_{ij} = c_i c_j. \quad (2)$$

核心-边缘模型的建模思路是将实际的数据网络与理想网络（星形网络，见图1）的邻接矩阵进行比较，从而找到网络中的核心点、半边缘点和边缘点。与理想网络对应的矩阵可称为模式矩阵，记为 Δ ，由 δ_{ij} 构成。在等式（1）中， ρ 是一个测度值， a_{ij} 表示 i 点和 j 点之间的货运量，由于有向网络在进行核心-边缘模型分析时，需要将数据进行对称化处理，所以在论文中， $a_{ij} = \max\{\vec{a}_{ij}, \vec{a}_{ji}\}$ ，其中， $\vec{a}_{ij}$ 表示 i 点至 j 点的航空货运量， $\vec{a}_{ji}$ 表示 j 点至 i 点的航空货运量。模式矩阵 Δ 的定义式为式（2）， c 是每个点的核心度，是一个非负向量。如果各个值有固定的分布，那么，当且仅当各个 a_{ij} 组成的云南省航空货运邻接矩阵 A 和由各个 δ_{ij} 组成的矩阵 Δ 相等的时候，测度值 ρ 才会达到最大值。这样，就 ρ 达到最大值而言，这种结构就是一个核心-边缘结构。连续型核心-边缘模型的目的是测试 c 的各个值，使得实际数据矩阵和模式矩阵的相关系数最大，从而得到唯一的核心度值 c 。

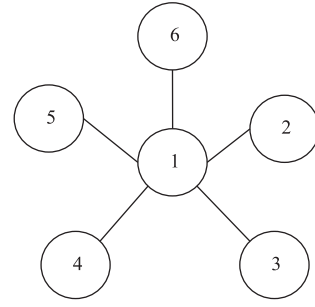


图1 规模为6的星型网络图

Fig. 1 Star network with scale of six

2.2 边关联度

边关联度定量测量在去掉图中一些线后，一对点在多大程度上仍然可以通过一条线连在一起，体现了节点间连接关系的稳定性。边关联度指数标记为 $\lambda(i, j)$ ，它等于为了使得这两个点之间不存在任何路径，必须从图中去掉的线的最小数目。 λ 值越大， i 和 j 就对去掉的一些线不敏感，二者之间的关系越稳健。

根据Lambda集合定义：子图 N_s 内部的任何一对点的边关联度都比任何一个由来自 N_s 的一个点与 N_s 外部一点构成的点对的边关联度要大，这样的子图 N_s 就叫做Lambda集合。凝聚子群分析采用边关联度对Lambda集合进行划分。

2.3 限制度

限制度指的是在网络中拥有的运用结构洞的能力，即控制信息传递的能力，具有方向性。以图2为例，点 i 受到点 j 的限制度 S_{ij} 计算公式如下：

$$S_{ij} = (p_{ij} + \sum_q p_{iq} p_{qj})^2, \quad (3)$$

式中， p_{ij} 为点 i 直接到点 j 的航空货运量占整个网络中航空货运量的比例； $p_{iq} p_{qj}$ 为点 i 经过点 q 到达点 j 的航空货运量占整个网络中航空货运量的比例。

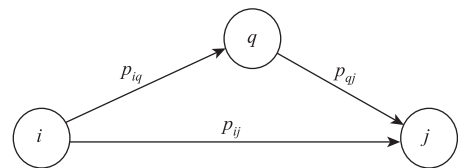


图2 限制度计算示例图

Fig. 2 Calculation example of constraint

2.4 等级度

等级度指的是限制性在多大程度上集中在一个点上，侧重描述一个节点在整个网络的货运流通过程中对其他节点的依赖性，依赖性越强，等级度越高。等级度计算公式又被称为科尔曼-泰尔失序指数，点 i 的等级度 H_i 计算公式如下（式4）：

$$H_i = \frac{\sum_j (\frac{S_{ij}}{S/n}) \ln(\frac{S_{ij}}{S/n})}{n \ln(n)}, \quad (4)$$

式中， n 是点 i 的个体网规模， S/n 是各个点的限制度均值。当所有的限制都集中在一个点的时候，该值达到最大值 1；反之，当网络中每个点的限制度都一样的时候，该测度值达到最小值 0。

2.5 冗余度

冗余度是对网络中节点间冗余联系描述的一种量化指标。非冗余联系表示网络中节点间的联系较少，从边的角度来说，就是能用最少数量的边来实现网络中各节点间的有效联通，多余的线的连接则被称为冗余联系。点 i 的冗余度 R_i 等于该点所在的个体网成员在网络中的平均度数^[27]。

$$R_i = \frac{2t}{n}, \quad (5)$$

式中， t 为 i 的个体网络中的关系数（不包括与点 i

相连的关系数）； n 为 i 的个体网规模（不包括自我点 i ）。

3 航空物流网络结构分析结果

从分布特征、群聚特征、连接机制、凝聚性 4 个方面分析云南省航空物流网络空间结构。

3.1 分布特征

运用 UCINET 软件对邻接矩阵进行核心 - 边缘分析，得到的各航空物流节点的核心度估计值（见表 4），模型的拟合检验值为 0.850，说明实际数据与模式数据间的相关系数很大，模型拟合结果较好。经过系数估计，昆明节点的核心度为 0.999，处于网络的核心位置，丽江、西双版纳和芒市节点处于网络的半核心位置，其核心度分别为 0.024，0.021，0.017，其余 8 座航空物流节点城市处于边缘位置，云南省航空物流网络的核心区与半核心区域与热点旅游城市一致，在航空物流资源走向上，受商旅影响较大。

表 4 核心度、限制度和等级度
Tab. 4 Corness, constraint and hierarchy

节点	限制度												等级度	核心度
	昆明	丽江	大理	西双版纳	芒市	腾冲	迪庆	昭通	文山	保山	临沧	普洱		
昆明	—	0.08	0.01	0.06	0.04	0.01	0	0	0	0	0	0	0.436	0.999
丽江	1	—	0	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0.651	0.024
大理	1	0	—	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0.634	0.006
西双版纳	1	0.09	0.01	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0.715	0.021
芒市	1	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0	1	0.017
腾冲	1	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0	1	0.007
迪庆	1	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	1	0.003
昭通	1	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0	1	0.001
文山	1	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0	1	0.001
保山	1	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	1	0.002
临沧	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	1	0.002
普洱	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	1	0.002

3.2 群聚特征

运用 UCINET 软件进行 Lambda 分析，结果如图 3 所示。横坐标为 Lambda 值，代表最小边关联度，纵坐标为航空物流网络节点的名称。最小边关联度是基于联系稳健性提出的概念，就网络连接的稳健性来说，昆明、西双版纳组成相对最稳健的子结构，当最小边关联度为 2 时，昆明、西双版纳、丽江、大理可以看成是一个 Lambda 集合，与云南省的热点旅游区域一致。

3.3 连接机制

运用 UCINET 软件进行伯特结构洞分析得到限

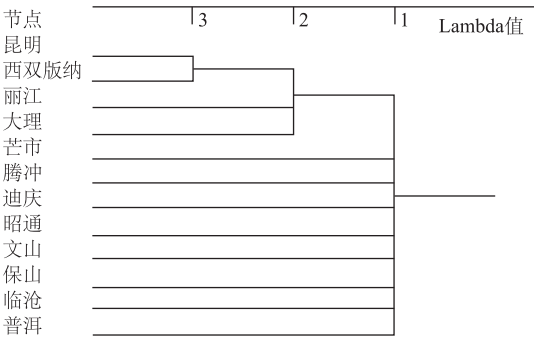


图 3 Lambda 集合树状图

Fig. 3 Tree diagram of Lambda collection

制度和等级度测算结果,见表4。观察计算结果,昆明市的航空物流节点受到的限制度均很小,甚至为0,但对其他城市航空物流节点的限制均很大,且为1,说明昆明市这个航空物流节点在网络中处于绝对中心化的位置,在网络连接中掌握了巨大的资源,并在很大程度上对网络中其他节点间的连接产生很大的影响。在11座航空物流节点城市中,能对昆明节点产生限制影响的仅5座,由大至小分别是丽江(0.08)、西双版纳(0.06)、芒市(0.04)、大理(0.01)、腾冲(0.01)。丽江和大理节点除了受到昆明节点的限制影响外,还均受到了西双版纳的限制。所以,昆明、西双版纳、丽江(因为昆明受到丽江的限制度最大)对云南省航空物流网络中各节点的连接产生了较重要的影响,如果这3座城市的航空物流节点服务能力下降或瘫痪,将对云南省整个航空物流网络的运作产生致命的影响。

等级度是对节点间所产生的依赖性的描述,除了昆明、丽江、大理、西双版纳外,其余城市的区域航空网络节点等级度均为1,即完全受到限制,根据拓扑图,与这些城市唯一相连的是昆明,所以这

些城市是100%依赖于昆明站点的运营情况,完全受昆明的限制。对于等级度不是1的城市,由高到低分别是:西双版纳(0.715)、丽江(0.651)、大理(0.634)、昆明(0.436)。西双版纳流入昆明的货运量在所有城市中最高(表1),昆明是西双版纳的一个重要货流吸收点,结合等级度分析结果,说明西双版纳更依赖于昆明这个节点进行转运至其他地点。西双版纳目前与昆明无铁路联通,公路等级也不高,公路运输困难较多,在航空运输上表现出对昆明节点过高的依赖性,当昆明航空物流节点失效后,将会造成西双版纳大量货物的积留与运输时限的延长。

3.4 凝聚性

运用 UCINET 软件进行伯特结构洞分析得到冗余度测算结果,见表5。观察冗余度计算结果,丽江、大理、西双版纳、昆明这4座城市的冗余度不为0,在网络的拓扑结构上容易形成凝结,其中丽江、大理、西双版纳节点间的冗余度最高,凝聚性最强,这些节点所在城市与云南省热点旅游区域一致。

表5 冗余度
Tab.5 Redundancy

节点	昆明	丽江	大理	西双版纳	芒市	腾冲	迪庆	昭通	文山	保山	临沧	普洱
昆明	—	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
丽江	0.02	—	0	0.97	0	0	0	0	0	0	0	0
大理	0.03	0	—	0.96	0	0	0	0	0	0	0	0
西双版纳	0.03	0.96	0.96	—	0	0	0	0	0	0	0	0
芒市	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0	0
腾冲	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0	0
迪庆	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0	0
昭通	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0	0
文山	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0	0
保山	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0	0
临沧	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—	0
普洱	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	—

4 航空物流网络结构空间组织形式的优化

现阶段云南省的航空物流网络是以昆明为核心的呈中心发散状的网络,昆明、西双版纳、丽江、大理间的连接稳定性、密集性强度较高,网络内的空间组织分化比较明显,已经形成以昆明-西双版纳为点轴式的一级航空走廊,以昆明、西双版纳、

丽江、大理为环状形成的二级航空圈。应注意到,云南省有国际口岸23个、对外通道90多条,是中国通往东南亚、南亚地区最便捷的通道。二级航空圈所涉及城市均为云南省的热点旅游城市,与云南省的商旅客运核心网络一致,但不利于口岸贸易、过境物流和区域内航空货运的长期发展。基于云南省地理区位优势 and 航空网络货运组织优化的原则,

为口岸贸易、口岸物流节点城市间的合作、提高云南省面向东南亚、南亚的货运便利性,结合跨境铁路、公路的立体化交通,对云南省的航空货运网络的空间组织形式进行优化。

一级核心区:将西双版纳节点加入航空网络的核心区范畴,形成区域双核(昆明-西双版纳)结构的航空物流轴辐式网络,兼顾中心城市(昆明)的中心性和口岸城市(西双版纳)的边缘性。云南省的航空物流网络是依赖于一个节点(昆明)发展的星型连通图,区域内所有节点城市均通过昆明节点与其他节点建立连接,一旦昆明节点失效,整个网络的联通性和运输的及时性容易受到影响,易造成整个网络的瘫痪,抗毁性上表现较差。前文结果显示昆明和西双版纳的核心度最高,但西双版纳在所有城市中的等级度仅次于与昆明形成单一连接的节点,等级度越高,说明对昆明节点的依赖性越强。虽然目前已经形成了昆明-西双版纳一级航空走廊,但西双版纳的运输过于依赖昆明节点。双核结构的轴辐式网络要求核心节点间的相互依赖性不强,为弱化西双版纳对昆明节点的依赖性,提高区域网络的抗毁性,近期可通过增设航线提高西双版纳的核心度。西双版纳不仅是云南省的旅游热点城市,也是云南省西南区域的重要物流节点城市,内设航空口岸,邻近磨憨口岸,且有昆曼公路经过,全方位的立体交通网络和设施方便西双版纳货运的集结,增开西双版纳直飞外省和国外的航线,能降低西双版纳在航空货运上对昆明站点的依赖(降低等级度),提高网络内的运行效率。

次级核心区:形成以昆明-西双版纳-丽江-芒市为端点的双环形航空走廊(昆明、丽江-西双版纳、昆明-芒市-西双版纳)次级核心网络。过境物流需求是云南物流需求区别于国内内陆地区物流需求的一大特点,在网络规划中,应提高口岸型物流节点城市的航空物流便利性及相互间联接的稳定性。在空间分布的位置结构上,处于半边缘区(根据核心度判断)的丽江、西双版纳、芒市所开通的航线数较少,尤其是芒市,芒市的航空物流节点建设并不受重视。Lambda子图凝聚子群分析显示芒市与子群间(昆明、西双版纳、丽江、大理)的联系较少,从网络连接密集度的表现看(即冗余度计算结果),芒市也处于拓扑结构凝聚区的外围。芒市邻近瑞丽口岸、瑞丽国家重点开发开放试验区,与缅甸连接紧密,地理位置距离昆明、西双版纳、丽江都较近,为适应和扩大边境贸易的影响,增强口

岸与口岸间城市的合作,建议提升芒市机场在云南航空网络中的重要性,增开芒市直飞外省、芒市至西双版纳和缅甸主要城市的航线,逐步突出芒市节点的空间结构地位和强化芒市与核心节点的连接密度。

5 结论

针对有向多值型网络,论文提出了一种网络空间结构的量化分析体系,区别于传统属性数据的研究思路,从关系数据的角度,对社会网络分析法在航空物流网络中的应用进行了探讨和实践,采用核心度、边关联度、限制度、等级度和冗余度5个定量指标,从节点空间位置、资源控制性、关系连接的稳定性、便利性、紧密性、传递性等多个角度描述了云南省航空物流网络的空间分布格局和集聚情况:分布特征、群聚特征、连接机制、凝聚性。结果显示网络呈高度集中化,是一个依赖于中心节点(昆明)发展的发散型连通图,在航空物流网络的布局上,更多的是考虑商旅客运的便利性,而没有充分利用跨境口岸和东盟贸易的资源,重客运而轻货运,造成边缘物流节点(芒市)资源的浪费。为了利用云南省的现有交通资源,避免空间差异程度的加深,调整云南省航空物流网络核心区和次级核心区的节点布局,提出了以“昆明-西双版纳”为核心的双环形航空走廊核心区网络,兼顾口岸物流节点城市的边缘性和区域中心城市的中心性,逐步提高西双版纳节点的核心性,突出芒市节点在区域网络中的位置,强化口岸城市间的合作,便于口岸物流的多式联运,满足过境物流的需求。

参考文献:

References:

- [1] 李国平,吴爱芝,孙铁山. 中国区域空间结构研究的回顾及展望[J]. 经济地理, 2012, 32(4): 6-11.
LI Guo-ping, WU Ai-zhi, SUN Tie-shan. A Review and Prospect of Research on Regional Spatial Structure in China[J]. Economic Geography, 2012, 32(4): 6-11.
- [2] 陆大道. 区域发展及空间结构[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
LU Da-dao. Regional Development and Spatial Structure[M]. Beijing: Science Press, 1995.
- [3] 陆大道. 区位论及区域研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
LU Da-dao. Location Theory and Regional Research Methods[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [4] 陆玉麒. 区域发展中的空间结构研究[M]. 南京:

- 南京师范大学出版社, 1988.
- LU Yu-qi. Study on Spatial Structure in Regional Development [M]. Nanjing: Nanjing Normal University Press, 1988
- [5] 陆玉麒. 区域双核结构模式的形成机理 [J]. 地理学报, 2002, 57 (1): 85-95.
- LU Yu-qi. The Mechanism of the Model of Dual-nuclei Structure [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57 (1): 85-95.
- [6] 杨勇, 周勤. 集群网络、知识溢出和企业家精神—基于美国高科技产业集群的证据 [J]. 管理工程学报, 2013, 27 (2): 32-37.
- YANG Yong, ZHOU Qin. Cluster Networks, Knowledge Spillovers and Entrepreneurship: Evidence from High-Tech Clusters in U. S. [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2013, 27 (2): 32-37.
- [7] 方叶林, 黄震方, 涂玮. 社会网络视角下长三角城市旅游经济空间差异 [J]. 热带地理, 2013, 33 (2): 212-218.
- FANG Ye-lin, HUANG Zhen-fang, TU Wei. Spatial Differences of Tourism Economy in Yangtze River Delta from the Perspective of Social Network [J]. Tropical Geography, 2013, 33 (2): 212-218.
- [8] 王姣娥, 莫辉辉, 金凤君. 中国航空网络空间结构的复杂性 [J]. 地理学报, 2009, 64 (8): 899-910.
- WANG Jiao-e, MO Hui-hui, JIN Feng-jun. Spatial Structural Characteristics of Chinese Aviation Network Based on Complex Network Theory [J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64 (8): 899-910.
- [9] 孙志伟, 王淑婧. 面向日本、韩国的山东半岛区域物流系统空间结构优化 [J]. 经济与管理研究, 2014 (12): 96-101.
- SUN Zhi-wei, WANG Shu-jing. Optimization of Space Structure of Logistic System Facing Japan and South Korea in Shandong Peninsula Area [J]. Research on Economics and Management, 2014 (12): 96-101.
- [10] BURGHOUWT G, HAKFOORT J, ECK J R V. The Spatial Configuration of Airline Networks in Europe [J]. Journal of Air Transport Management, 2003, 9 (5): 309-323.
- [11] BURGHOUWT G. Airline Network Development in Europe and Its Implications for Airport Planning [J]. Ashgate, 2000, 8 (3): 264-265.
- [12] BOWEN J. Airline Hubs in Southeast Asia: National Economic Development and Nodal Accessibility [J]. Journal of Transport Geography, 2000, 8 (1): 25-41.
- [13] JIMENEZ E, CLARO J, SOUSA J P D. Spatial and Commercial Evolution of Aviation Networks: A Case Study in Mainland Portugal [J]. Journal of Transport Geography, 2012, 24 (4): 383-395.
- [14] 张兵, 胡华清, 张莉, 等. 中国航空货运发展及其空间格局研究 [J]. 地理科学, 2010 (4): 489-495.
- ZHANG Bing, HU Hua-qing, ZHANG Li, et al. The Air Cargo Transportation Development and Air Cargo Flow's Spatial Pattern in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010 (4): 489-495.
- [15] 曾小舟. 基于复杂网络理论的中国航空网络结构实证研究与分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- ZENG Xiao-zhou. Empirical Study and Analysis of Chinese Aviation Network Structure Based on Complex Network Theory [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [16] 党亚茹, 周莹莹, 王莉亚, 等. 基于复杂网络的国际航空客运网络结构分析 [J]. 中国民航大学学报, 2009, 27 (6): 41-44.
- DANG Ya-ru, ZHOU Ying-ying, WANG Li-ya, et al. International Air Transport Network Structure Analysis Based on Complex Networks [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2009, 27 (6): 41-44.
- [17] 薛丽萍, 欧向军, 耿雪, 等. 淮海城市群空间结构的演化特征分析 [J]. 江苏师范大学学报: 自然科学版, 2014 (4): 7-12.
- XUE Li-ping, OU Xiang-jun, GENG Xue, et al. Evolvement Characteristics of the Spatial Structure of Huaihai Urban Agglomeration [J]. Journal of Jiangsu Normal University: Natural Science Edition, 2014 (4): 7-12.
- [18] 沈玉芳, 王能洲, 马仁锋, 等. 长三角区域物流空间布局及演化特征研究 [J]. 经济地理, 2011, 31 (4): 618-623.
- SHEN Yu-fang, WANG Neng-zhou, MA Ren-feng, et al. A Research on the Spatial Distribution of Regional Logistics and Evolution in the Yangtze River Delta [J]. Economic Geography, 2011, 31 (4): 618-623.
- [19] 汤放华, 汤慧, 孙倩, 等. 长江中游城市群经济网络结构分析 [J]. 地理学报, 2013, 68 (10): 1357-1366.
- TANG Fang-hua, TANG Hui, SUN Qian, et al. Analysis of the Economic Network Structure of Urban Agglomerations in the Middle Yangtze River [J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68 (10): 1357-1366.
- [20] 陈修颖, 陆林. 长江经济带空间结构形成基础及优化研究 [J]. 经济地理, 2004, 24 (3): 326-329.
- CHEN Xiu-ying, LU Lin. Study on Forming Base and Optimization of Spatial Structure in Yangtze River Zone [J]. Economic Geography, 2004, 24 (3): 326-329.

(下转第152页)

- 2006, 26 (12): 3917–3923.
- [11] 李耀增, 周铁军, 姜海波. 青藏铁路格拉段野生动物通道利用效果 [J]. 中国铁道科学, 2008, 29 (4): 127–131.
- LI Yao-zeng, ZHOU Tie-jun, JIANG Hai-bo. Utilization Effect of Wildlife Passages in Golmud–Lhasa Section of Qinghai-Tibet Railway [J]. China Railway Science, 2008, 29 (4): 127–131.
- [12] 张洪峰, 封托, 姬明周, 等. 青藏铁路小桥被藏羚等高原野生动物利用的监测研究 [J]. 生物学通报, 2009, 44 (10): 8–10.
- ZHANG Hong-feng, FENG Tuo, JI Ming-zhou, et al. The Monitor Study on the Utilization of Qinghai–Tibetan Railway Bridge by the Tibetan Antelope and Other Wildlives [J]. Bulletin of Biology, 2009, 44 (10): 8–10.
- [13] 封托, 张洪峰, 吴晓民. 青藏铁路运营期野生动物通道利用状况初探 [J]. 陕西林业科技, 2013 (6): 42–45.
- FENG Tuo, ZHANG Hong-feng, WU Xiao-min. Utilization of Wildlife Underpasses on Qinghai–Tibetan Railway during the Operation [J]. Shanxi Forest Science and Technology, 2013 (6): 42–45.
- [14] 王云, 关磊, 陈济丁, 等. 青藏高原线性工程野生动物保护研究进展 [J]. 公路与自然, 2014, 21 (2): 106–109.
- WANG Yun, GUAN Lei, CHEN Ji-ding, et al. Research Progress in Wildlife Protection of Linear Project in Qinghai–Tibet Plateau [J]. Highway & Nature, 2014, 21 (2): 106–109.
- [15] 殷宝法, 于智勇, 杨生妹, 等. 青藏公路对藏羚羊、藏原羚和藏野驴活动的影响 [J]. 生态学杂志, 2007, 26 (6): 810–816.
- YIN Bao-fa, YU Zhi-yong, YANG Sheng-mei, et al. Effects of Qinghai–Tibetan Highway on the Activities of *Pantholops hodgsoni*, *Procapra picticaudata* and *Equus kiang* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26 (6): 810–816.
- [16] 吴晓民, 张洪峰. 藏羚羊种群资源及其保护 [J]. 自然杂志, 2011, 33 (3): 143–154.
- WU Xiao-min, ZHANG Hong-feng. Resources Regarding Populations of Tibetan Antelope (*Pantholops Hodgsoni*) and the Status of Its Protection [J]. Chinese Journal of Nature, 2011, 33 (3): 143–154.
- [17] 王云, 关磊, 朴正吉, 等. 应用红外相机技术监测长白山区公路对大中型兽类出现率的影响 [J]. 四川动物, 2016, 35 (4): 593–600.
- WANG Yun, GUAN Lei, PIAO Zheng-ji, et al. Impacts of Highways on the Occurrence Rate of Middle-to-large Mammals in Changbai Mountain Based on Camera-trapping [J]. Sichuan Journal of Zoology, 2016, 35 (4): 593–600.
- [18] SAWYER H, RODGERS P A, HART T. Pronghorn and Mule Deer Use of Underpasses and Overpasses Along U. S. Highway 191 [J]. Wildlife Society Bulletin, 2016, 40 (2): 211–216.

(上接第 145 页)

- [21] 曾鹏, 黄图毅, 阙菲菲. 中国十大城市群空间结构特征比较研究 [J]. 经济地理, 2011, 31 (4): 603–608.
- ZENG Peng, HUANG Tu-yi, QUE Fei-fei. Comparative Study on Spatial Structure Characteristics of Chinese Ten Top Urban Agglomeration [J]. Economic Geography, 2011, 31 (4): 603–608.
- [22] IRWIN M D, KASARDA J D. Air Passenger Linkages and Employment Growth in US Metropolitan Areas [J]. American Sociological Review, 1991, 56 (4): 524–537.
- [23] DEBBAGE K G. Air Transportation and Urban–Economic Restructuring: Competitive Advantage in the US Carolinas [J]. Journal of Air Transport Management, 1999, 5 (4): 211–221.
- [24] 中国交通年鉴社. 中国交通年鉴 [M]. 北京: 中国交通年鉴社, 2014.
- China Traffic Yearbook Press. China Traffic Yearbook [M]. Beijing: China Traffic Yearbook Press, 2014.
- [25] 刘军. 整体网分析讲义—UCINET 软件使用指南 [M]. 2 版. 上海: 格致出版社, 2014.
- LIU Jun. Lecture Notes on Whole Network Approach: A Practical Guide to UCINET [M]. 2nd ed. Shanghai: Truth & Wisdom Press, 2014.
- [26] 罗家德. 社会网分析讲义 [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2005.
- LUO Jia-de. Lecture Notes on Social Network Analysis [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2005.
- [27] BORGATTI S P, EVERETT M G. Network Analysis of 2-Mode Data [J]. Social Networks, 1997, 19 (3): 243–269.